

кість дорожно-транспортних пригод і травматизму в вечірні та нічні години, а також поліпшення криміногенної ситуації на вулицях міст.

Використовуючи системи ОЗ та інші системи, розроблені на базі АСУ, групування їх в комплекс систем, можна зрівноважити добовий графік навантаження міста, селища або району та оптимізувати роботу енергосистеми.

1.Говоров Ф.П., Говоров В.Ф. Повышение уровня автоматизации управления распределительными сетями, как фактор ресурсо- и энергосбережения // Энергетика и электрификация. – 2004. – №9. – С.12-17.

2.Соколов В.Ф. Степанов А.В. Харченко В.Ф. Автоматический контроль и локализация аварийных ситуаций в установках наружного освещения // Светотехника. –1995. – №2. – С.12-14.

3.Дижон Ж.М. Автоматическое управление освещением туннелей BELLIARD в Брюсселе // Светотехника. –1994. – №6. – С.9-12.

4.НИИ Точной Механики, Управления сетями наружного освещения «АВРОРА» // [http://www.izh.ru/res/d_3_sozyv_16197_1_rtf\(973KB\)23.03.2004](http://www.izh.ru/res/d_3_sozyv_16197_1_rtf(973KB)23.03.2004).

5.Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б.Айзенберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.

Отримано 07.06.2006

УДК 621.311

О.Г.ГРИБ, д-р техн. наук, Г.А.СЕНДЕРОВИЧ, канд. техн. наук,
П.Г.СЕНДЕРОВИЧ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УЧАСТИЯ СУБЪЕКТОВ В НАРУШЕНИИ СИММЕТРИИ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Проведено моделирование предложенной авторами методики определения участия субъектов в создании несимметрии на сборных шинах. Показано, что методика дает определение участия, независимое от факторов, вызывающих несимметрию. Выявлены особенности влияния ошибки по сопротивлению связи с системой на погрешности коэффициентов участия.

Сегодня в Украине все больше внимания уделяется вопросам качества электроэнергии. Это связано с переходом экономики на рыночные отношения, при которых влияние качества электрической энергии на протекание технологических процессов производственного оборудования и на потери электрической энергии не могут оставаться без внимания. Убытки, которые несут субъекты процесса распределения электрической энергии от ухудшения ее качества сверх допустимых норм [1], должны оплачиваться виновниками нарушения качества.

В основу методики определения ответственности за нарушение симметрии субъектами распределения электрической энергии [2] по-

ложен расчет коэффициентов участия [3]. Вывод выражений, определяющих участие потребителей в создании несимметрии на сборных шинах по нулевой последовательности, основан на измерении фазных проводимостей нагрузки и достаточно нагляден. В отличие от нулевой последовательности, в нарушении симметрии по обратной последовательности может участвовать сетевое предприятие, что усложняет задачу. В результате, выражения для определения участия субъектов в нарушении симметрии по обратной последовательности достаточно сложны, зависимы от условий возникновения несимметрии, их нельзя назвать наглядными.

Целью статьи является проверка на математической модели основных закономерностей влияния субъектов на нарушение симметрии по обратной последовательности, полученных аналитическим путем.

Одним из основных достоинств выражений для определения участия субъектов в создании несимметрии [3] является то, что значения коэффициентов участия определяются соотношением уровней несимметрии субъектов и не зависят от причин, вызывающих несимметрию (факторов несимметрии). Факторы несимметрии определяют фазовый сдвиг (угол δ_2) между напряжением обратной последовательности $\underline{U}_2^{//}$, создаваемым в ТОП несимметричной нагрузкой потребителя, и напряжением обратной последовательности системы \underline{E}_2 . В силу того, что угол δ_2 есть величина случайная, не связанная с уровнем несимметрии субъектов, коэффициенты участия не должны зависеть от него.

На модели [4] выполнены опыты, в которых используются два фактора несимметрии, каждый из которых оказывает близкое по величине влияние на несимметрию в ТОП. Несимметрия системы моделируется снижением одного из фазных напряжений до $U_{\phi} = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$. Несимметрия нагрузки потребителя достигается снижением сопротивления суммарной нагрузки фазы А до $Z_{\text{нА}} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$. Ниже приведен ряд опытов.

Опыт нарушения симметрии только системой (табл.1, опыт 1). Введена несимметрия системы по фазе А: $U_A = 0,8 \cdot U_{\phi \text{ ном}}$, нагрузка задана симметричной. При этом, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности в ТОП $K_{2U} = 0,071$; коэффициент несимметрии нагрузки $K_{2\text{н}} = 0$; коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемый системой в ТОП $K_{2U}' = K_{2U} = 0,071$; коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемый нагрузкой в ТОП $K_{2U}^{//} = K_{2\text{н}} = 0$;

коэффициент участия системы в создании несимметрии в ТОП $K_{\text{уч сист}} = 1$; коэффициент участия нагрузки в создании несимметрии в ТОП $K_{\text{уч н}} = 0$.

Таблица 1 – Участие субъектов в нарушении симметрии при расположении факторов несимметрии в фазе А

Номер опыта	Факторы несимметрии	K_{2U}	$K_{2н}$	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{\text{уч сист}}$	$K_{\text{уч н}}$
1	$U_A = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = Z_{\text{н}}$	0,071	0	0,071	0	1	0
2	$U_A = U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
3	$U_A = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,143	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Опыт нарушения симметрии только нагрузкой (табл.1, опыт 2). Введено $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$ и симметричное напряжение системы. При этом имеем следующий набор значений используемых коэффициентов: $K_{2U} = 0,079$; $K_{2н} = 0,438$; $K'_{2U} = 0$; $K''_{2U} = K_{2U} = 0,79$; $K_{\text{уч сист}} = 0$; $K_{\text{уч н}} = 1$.

Опыт нарушения симметрии системой и нагрузкой одновременно (табл.1, опыт 3). Вводим оба фактора несимметрии по фазе А: $U_A = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}}$ и $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$. Наблюдаем следующие значения используемых коэффициентов: $K_{2U} = 0,143$; $K_{2н} = 0,438$; $K'_{2U} = 0,71$; $K''_{2U} = 0,79$; $K_{\text{уч сист}} = 0,474$; $K_{\text{уч н}} = 0,526$.

Расчетная величина коэффициентов несимметрии в ТОП, создаваемых источниками, расположенными в системе (K'_{2U}) или в нагрузке (K''_{2U}) определяет несимметрию в ТОП. Так, в случае расположения источника несимметрии только в системе $K_{2U} = K'_{2U}$, при $K''_{2U} = 0$. В случае расположения источника только в нагрузке $K_{2U} = K''_{2U}$, при $K'_{2U} = 0$. Соответственно распределяются коэффициенты участия. В опыте 1 – $K_{\text{уч сист}} = 1$; $K_{\text{уч н}} = 0$, в опыте 2 – $K_{\text{уч сист}} = 0$; $K_{\text{уч н}} = 1$. В опыте 3 – несимметрия в ТОП зависит от обоих источников. Причем, каждый из источников оказывает влияние такое, как при раздельном воздействии: $K'_{2U} = 0,71$; $K''_{2U} = 0,79$. Уча-

стие распределяется пропорционально коэффициентам K'_{2U} и K''_{2U} [3].

$$K_{2 \text{ уч } \Sigma} = \frac{K''_{2U}}{K'_{2U} + K''_{2U}}; K_{2 \text{ уч сист}} = \frac{K'_{2U}}{K'_{2U} + K''_{2U}}. \quad (1)$$

Опыты 1-3 показывают соответствие полученных результатов описанию нарушений симметрии с одним и двумя источниками несимметрии [3].

Рассмотрим влияние фазового сдвига между \underline{U}_2 и \underline{E}_2 на определение участия субъектов. Для этого меняем аргумент вектора \underline{E}_2 , сохранив без изменения аргумент вектора \underline{U}_2 . Вводим несимметрию по фазам В и С, такую же, как в предыдущих опытах использовалась в фазе А. Несимметрия по фазе В обеспечивается условием $U_B = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}}$ (табл.2), по фазе С – $U_C = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}}$ (табл.3).

Таблица 2 – Участие субъектов в нарушении симметрии при расположении фактора несимметрии системы в фазе В, фактора несимметрии нагрузки в фазе А

Номер опыта	Факторы несимметрии	K_{2U}	$K_{2н}$	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{\text{уч сист}}$	$K_{\text{уч н}}$
1	$U_B = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = Z_{\text{н}}$	0,071	0	0,071	0	1	0
2	$U_B = U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
3	$U_B = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,075	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Таблица 3 – Участие субъектов в нарушении симметрии при расположении фактора несимметрии системы в фазе С, фактора несимметрии нагрузки в фазе А

Номер опыта	Факторы несимметрии	K_{2U}	$K_{2н}$	K'_{2U}	K''_{2U}	$K_{\text{уч сист}}$	$K_{\text{уч н}}$
1	$U_B = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = Z_{\text{н}}$	0,071	0	0,071	0	1	0
2	$U_B = U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,079	0,438	0	0,079	0	1
3	$U_B = 0,8 \cdot U_{\text{ф ном}};$ $Z_{нА} = 0,3 \cdot Z_{\text{н}}$	0,088	0,438	0,071	0,079	0,474	0,526

Как показывают опыты, отличие в полученных на модели значениях коэффициентов при введении несимметрии в разных фазах наблюдаются только в одном, но основном, контролируемом согласно

ГОСТу показателе – коэффициенте несимметрии напряжения по обратной последовательности в ТОП – K_{2U} . При введении фактора несимметрии системы по фазе А значение коэффициента составляет 0,143; по фазе В – 0,075; по фазе С – 0,088. Полученное отличие понятно с физической точки зрения и объясняется разной степенью, зависимой от угла δ_2 , взаимной компенсации несимметрий системы, с одной стороны, и нагрузки – с другой.

Главной особенностью проведенных опытов является то, что они показали: коэффициенты несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U}' и K_{2U}'' , создаваемые субъектами в ТОП, не зависят от фазового сдвига δ_2 . Соответственно, не зависят от угла δ_2 и коэффициенты участия системы $K_{\text{уч сист}}$ и нагрузки $K_{\text{уч н}}$. Измерение участия субъектов распределения электрической энергии в нарушении симметрии определяется величиной воздействия несимметрии, создаваемой ими, на несимметрию в ТОП и не зависит от факторов, вызывающих несимметрию.

Определение участия субъектов в создании несимметрии на сборных шинах требует введения сопротивления связи между ТОП и системой. Сопротивление связи (Z_C) – это расчетная величина, поэтому в обязательном порядке будут иметь место неточности по ее оценке. На математической модели [4, Б.6] проведены опыты, в которых определены зависимости от погрешности введения сопротивления связи ΔZ_C : коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в ТОП – K_{2U} ; коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, – K_{2U}' ; коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, – K_{2U}'' ; коэффициента участия системы в создании несимметрии в ТОП – $K_{2\text{уч сист}}$ и коэффициента участия нагрузки в создании несимметрии в ТОП – $K_{2\text{уч н}}$.

Для обеспечения возможности приведения погрешностей, полученных в разных опытах, к одинаковым условиям опыты выполнены при условии постоянства суммы коэффициентов K_{2U}'' и K_{2U}' ($K_{2U}'' + K_{2U}' = 0,3$). В качестве факторов несимметрии в системе использованы изменения амплитуды фазного напряжения U_A , у потребителя – модуля сопротивления нагрузки фазы $Z_{нА}$. Регулирование факторов несимметрии в модели осуществляется через коэффициенты

f, k:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_A - f \cdot \Delta \underline{U}; \underline{Z}_{HA} = \underline{Z}_{HA} - k \cdot \Delta \underline{Z}_{HA}. \quad (2)$$

Ошибка определения сопротивления связи вводится в модель через коэффициент d: $\Delta \underline{Z}_C = d \cdot \Delta \underline{Z}_C$. Диапазон изменения погрешностей составляет $\pm 50\%$. По этому вопросу проделан ряд опытов. Найдены графики характеризующие изменения показателей несимметрии в зависимости от относительной погрешности ΔZ_C^* . Из полученных результатов можно сделать вывод, что значения коэффициентов участия системы $K_{2 \text{ уч сист}}$ и нагрузки $K_{2 \text{ уч н}}$ в создании несимметрии на сборных шинах заметно зависят от сопротивления связи. Представляет интерес точность определения участия субъектов в нарушении симметрии по обратной последовательности. С этой целью выполнены расчеты погрешностей коэффициента участия системы – $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ и погрешности его составляющих – $\Delta K_{2U}'$ и $\Delta K_{2U}''$ в функции от ΔZ_C^* .

Погрешности коэффициента участия системы приведены к сумме коэффициентов участия:

$$\Delta K_{2 \text{ уч сист}} = \frac{K_{2 \text{ уч сист}} - K_{2 \text{ уч сист}}(0)}{K_{2 \text{ уч сист}} + K_{2 \text{ уч н}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где в силу условия $K_{2 \text{ уч сист}} + K_{2 \text{ уч н}} = 1$.

Погрешности коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП, – K_{2U}' и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП, – K_{2U}'' приведены в соответствии с формулой (1) к их сумме:

$$\Delta K_{2U}' = \frac{K_{2U}' - K_{2U}'(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%; \Delta K_{2U}'' = \frac{K_{2U}'' - K_{2U}''(0)}{K_{2U}' + K_{2U}''} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В диапазоне изменения ошибки по сопротивлению связи $\Delta Z_C^* = \pm 50\%$ погрешность определения участия системы $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ составляет от $-23,2$ до $30,7\%$ (рис.1).

Рассмотрим, чем определяются погрешности коэффициентов участия. Для этого сопоставим в функции от ΔZ_C^* изменения $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$, с изменениями погрешностей коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП –

$\Delta K'_{2U}$, и коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой в ТОП – $\Delta K''_{2U}$ (рис.2).

Из графиков следует, что погрешности возрастают по мере увеличения участия нагрузки в нарушении симметрии по обратной последовательности. Характер изменения погрешности $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ определяется, в основном, погрешностью коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой – $\Delta K'_{2U}$ (рис.2, б-д). Это объясняется тем, что при нахождении составляющей K'_{2U} погрешность вносится непосредственно в определение падения напряжения на сопротивлении связи

$$\bar{E}_S = \bar{U}_S + \underline{Z}_{c2} \cdot \bar{I}_S. \quad (5)$$

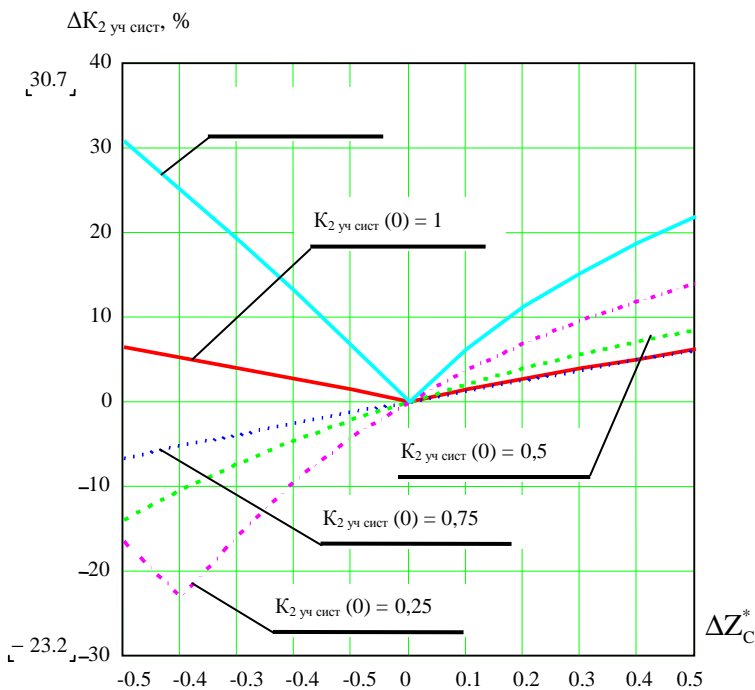


Рис.1 – Зависимость погрешности расчета коэффициентов участия от ошибки задания сопротивления связи

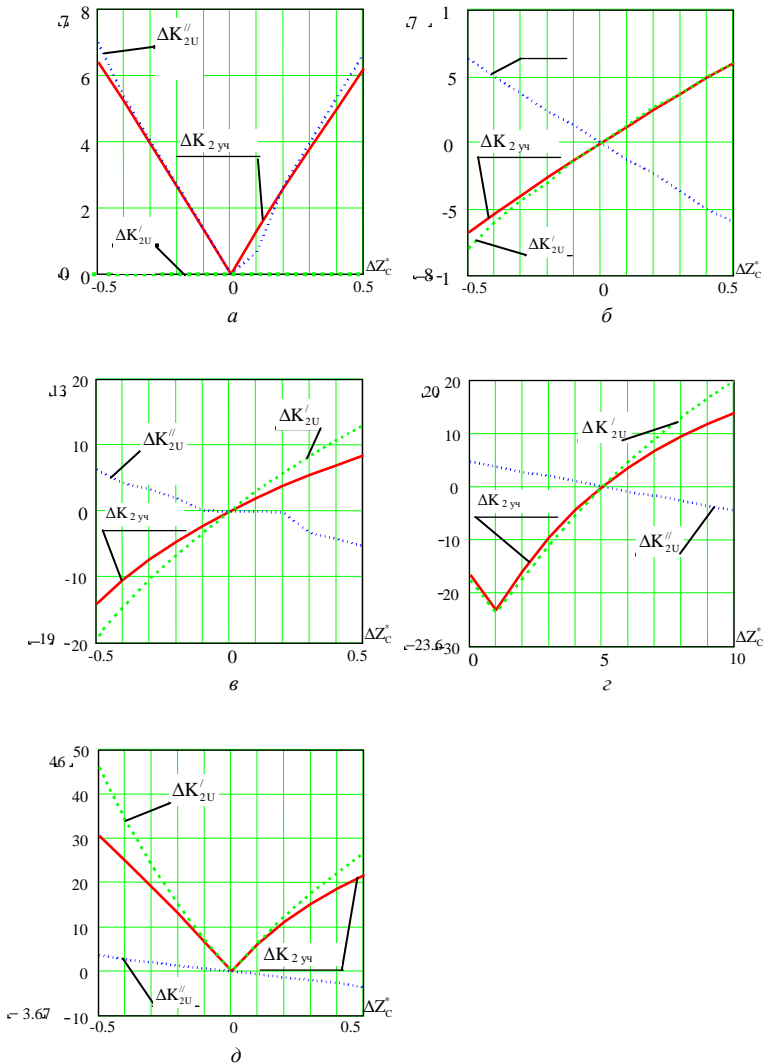


Рис.2 – Погрешности параметров, характеризующих несимметрию,

в зависимости от ΔZ_c при:

$a - K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 1$; $\delta - K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,75$; $\epsilon - K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,5$; $z - K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0,25$;
 $\partial - K_{2 \text{ уч сист}}(0) = 0$.

При симметричной нагрузке характер изменения $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ определяется исключительно погрешностью коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого нагрузкой – $\Delta K_{2U}^{//}$ (рис.2, а). В этом случае проявляются признаки нарушения симметрии по обратной последовательности при симметричной нагрузке

$$\left. \begin{aligned} K_{2 \text{ н } \Sigma} &= 0; \\ K_{2 \text{ л } \Sigma} &= K_{2 \text{ у } \Sigma} = K_{2 \text{ е } \Sigma} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Таким образом, измерение участия субъектов распределения электрической энергии в нарушении симметрии определяется величиной воздействия несимметрии, создаваемой ими, на несимметрию в ТОП и не зависит от факторов, вызывающих несимметрию. Ошибка по вводу сопротивления связи с системой приводит к погрешности определения участия субъектов. В диапазоне изменения ошибки по сопротивлению связи $\Delta Z_C^* = \pm 50\%$ погрешность определения участия системы $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ составляет от $-23,2$ до $30,7\%$. При наличии несимметрии в системе и в нагрузке характер изменения погрешности в определении участия субъектов $\Delta K_{2 \text{ уч сист}}$ определяется, в основном, погрешностью коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности, создаваемого системой в ТОП – $\Delta K_{2U}^{//}$.

1.ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 18.06.99. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 30 с.

2.Сендерович Г.А. Определение ответственности субъектов распределения электрической энергии за нарушение симметрии на сборных шинах. – Харьков: ХНАГХ, 2005. – С.255-259.

3.Сендерович Г.А. Анализ влияния потребителей на симметрию по обратной последовательности в точке общего присоединения // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – №13. – С.89-94.

4.Сендерович Г.А., Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Математическая модель для исследования несимметричных режимов трехфазной сети // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Вип.57. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2005. – С.86-93.

Получено 20.06.2006